

遠隔誘導型電位差法による裏面き裂計測と有限要素法解析*

佐藤康元^{*1}, 庄子哲雄^{*1}

Evaluation of Back-Wall Fatigue Cracks by Means of Remotely Induced Current Potential Drop Technique and Its FEM Simulation

Yasumoto SATO^{*2}, Tetsuo SHOJI

^{*2} Fracture and Reliability Research Institute (FRI), Tohoku University
Aramaki Aoba6-6-01, Aoba-ku Sendai, 980-8579 Japan

During operation, different defects initiate and grow in machine components due to fatigue, SCC, etc., and the reliability of components decreases with operating time. The performance and safety have to be maintained by regular and adequate inspection techniques and appropriate treatment. In this study, the applicability of Remotely Induced Current Potential Drop (RICPD) technique to the evaluation of the size of back-wall fatigue cracks was investigated and the possibility of numerical simulation for the RICPD measurements was discussed. Finite Element Method (FEM) analysis for the RICPD measurements on the plate specimen of type 304 stainless steel containing artificial back-wall defects was performed and calculated potential drop changes by FEM simulation for the back-wall defects show good agreement with experimental results. Sizing of back-wall fatigue crack in the plate specimen of type 304 stainless steel with a thickness of 10mm was performed by the RICPD technique. Comparisons between evaluated and actual depths of back-wall fatigue crack reveal that the RICPD technique can perform accurate maximum depth estimation of back-wall fatigue crack with the error of 0.93%.

Key Words : Fatigue, Crack, Nondestructive Inspection, Finite Element Method, Stainless Steel, Potential Drop Technique

1. 結 言

社会的・経済的要請から、大型機器・構造物は十分な安全性と経済性が保たれる限り、長期にわたり運用されつづけることが望ましい⁽¹⁾。このために、最小の補修費による劣化部位の補修・更新計画の策定が必要であり、機器・構造物の各部位における劣化の定量的把握と余寿命評価の精度向上が特に重要である。そしてこれらを支える技術のひとつである経年損傷の非破壊的計測・評価には「早く、安くそして正確な」技術の開発が望まれている⁽²⁾。

寿命評価の際に問題となる経年劣化は、形態および程度は異なるが、き裂型劣化、材質型劣化、表面損傷型劣化の三つに大別できる⁽¹⁾。このうち、き裂の先端は鋭く、それゆえき裂は応力のもっとも厳しい集中源となり、航空機や船舶はもとより、ロボットや電子パッケージなどまであらゆる機械や構造物において最も

危険な劣化であるといっても過言ではない^{(3),(4)}。しかし、一般にき裂は無負荷状態であっても閉じており、このことがき裂の検出と評価を困難にしている⁽⁵⁾。

非破壊検査技術の一つである電位差法は、破壊力学的試験における疲労き裂長さの高精度測定に用いられるなど、疲労き裂を精度良く測定可能な手法の一つとして知られている。このうち直流電位差法は測定面と逆側の面に存在する裏面疲労き裂に対しても感度よく形状評価ができる手法である⁽⁶⁾が、大電流を安定的に検査対象に印加する必要があるため探傷に適しているとは必ずしも言えない。小さい電流値で感度よく表面き裂の検出と評価を行うことのできる新しい直流電位差法が坂ら⁽⁷⁾により提案されているが、裏面き裂へと適用した例はない。一方、交流電位差(Alternative Current Potential Drop; ACPD)法は表皮効果のため直流電位差法の数十分の一の電流値で測定に十分な電位差を得ることができ、主に表面欠陥を感度よく検出・評価可能な手法である^{(8),(9)}が、この表皮効果のため裏面き裂の評価へ適用した例は見あたらない。

*原稿受付 年 月 日

^{*1}正員、東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6601)

E-mail: yasumoto.sato@rift.mech.tohoku.ac.jp

ACPD法の欠陥検出感度をさらに高めるため、集中誘導型交流電位差(Induced Current Focusing Potential Drop, 以下ICFPDとする)法がKimら⁽¹⁰⁾により開発され、その高度化が進められている。本手法は電磁誘導現象により試験片に誘導電流を発生させ、欠陥による誘導電流の乱れに起因する電位差変化を欠陥信号として測定するもので、通常のACPD法と同様に測定面に存在する疲労き裂に対しては高精度でその存在や形状の計測が可能であると報告されている⁽¹¹⁾。誘導電流を含めたACPD法による裏面欠陥の検出と評価において最も大きな問題となるのは、いかに効率的に裏面側まで電流を印加するかという点とともに、無欠陥部における信号のばらつきに対する欠陥信号の大きさ、すなわちS/N比である。これに対して最近、電流を誘導する誘導線を検査対象表面から大きく離れた位置に配置する新しい探触子を用いた手法である、遠隔誘導型電位差(Remotely Induced Current Potential Drop, 以下RICPD法とする)法が開発され、誘導電流に対する試験片表面の凹凸の影響を低減することができ、その結果溶接部人工欠陥に対するS/N比を大幅に向上させることが可能であるとの報告がなされた⁽¹²⁾が、裏面疲労き裂の検出と評価へと適用した例はない。

本研究では、このRICPD法の裏面欠陥信号に対する有限要素法解析の可能性について検討し、RICPD法の裏面欠陥検出感度をICFPD法と比較することでその有用性を示すとともに、RICPD法を裏面疲労き裂の評価へと適用した結果について報告する。

2. 実験方法

2・1 試験片 供試材は厚さ 10mmのオーステナイト系ステンレス鋼SUS304 平板で、2 次元人工欠陥が導入された欠陥深さ-電位差校正曲線作成用試験片(以下、人工欠陥試験片とする)および、疲労き裂が導入された試験片(以下、疲労き裂試験片とする)の 2 種類の試験片を作製した。人工欠陥試験片には幅が約0.2mm、深さ d が 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5mmの 5 種類の 2 次元スリットが放電加工により導入されている。疲労き裂試験片は、放電加工により深さ 5mm、長さ 20mmの半楕円状スリットを有する板厚 15mmの試験片を 3 点曲げ疲労き裂進展試験に供し、半楕円状スリットから疲労き裂を発生・進展させたのち放電加工によるスリット部分を除去して疲労き裂のみを有する板厚 10mmの試験片へと加工した。Newman-Rajuの解⁽¹³⁾により求めた、疲労き裂進展試験開始時の応力拡大係数は、き裂の最深点で $9.0\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ ^{1/2}、表面点で $20.1\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ ^{1/2}である。これらの試験片の概略図を図 1 に示す。

2・2 探触子 ICFPD法およびRICPD法の探触子の概略および寸法を図 2 に示す。これらの探触子は、一対の電位差測定端子、試験片に電流を誘導する誘導線、およびそれらを測定装置へと接続するシールド線から構成されている。ICFPD法の探触子では誘導線は試験片の表面近傍に配置して電流を誘導する。このため比較的小さい電流を用いても大きな電流を誘導することができるが、探触子底部と試験片との物理的接触状態に起因する誘導電流値の変化も大きいものと考え

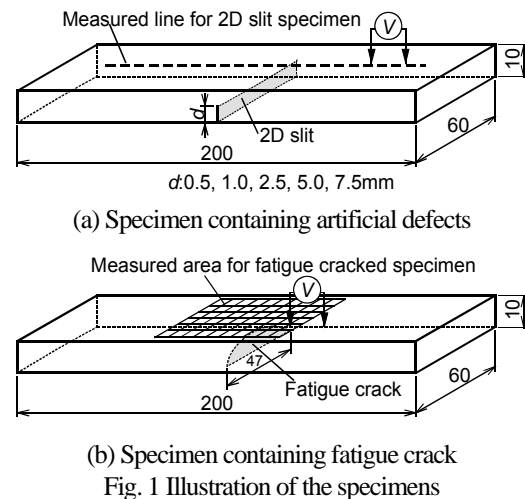


Fig. 1 Illustration of the specimens

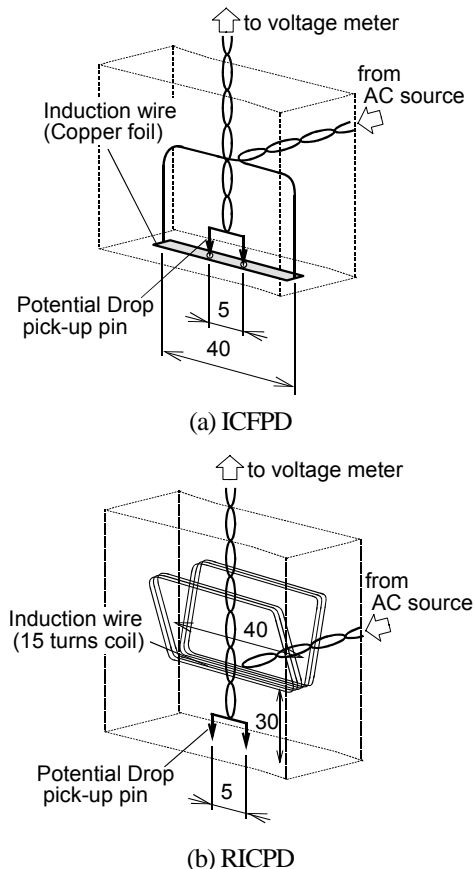


Fig. 2 Illustration of the sensors for the ICFPD and RICPD techniques

られる。これに対して、RICPD法の探触子では測定面から30mm離れた位置に誘導線が配置されている。このため探触子底部と試験片との接触状態に起因する誘導電流値の変化は相対的に小さくなる⁽¹²⁾。誘導線はICFPD法では誘導線が薄い銅の箔であるのに対し、RICPD法では、誘導線と試験片の距離が大きくなったことによる誘導電流値の減少を補うために、15回巻きのコイルを使用した。

2・3 測定方法 人工欠陥試験片においては、図1(a)に示したように試験片中央長手方向に設定された測定ラインに沿って探触子を0.2mm間隔で移動させて測定を行った。また疲労き裂試験片では、図1(b)に示したように長手方向にX軸、幅方向にY軸を設定し、き裂を含む領域においてX方向に0.5mm間隔、Y方向に1mm間隔で設定された格子点を測定した。いずれの測定も、探触子の誘導線および電位差測定端子を欠陥長手方向に対して垂直に配置し、導入された欠陥が裏面欠陥となるよう欠陥開口面と逆側の面上を測定した。用いた交流電流の周波数はICFPD法では0.3kHz、RICPD法では3kHz、電流値は2Aで、これらの値は予備試験により決定されたものである。

3. 2次元人工欠陥測定結果および考察

3・1 裏面欠陥に対する信号分布 図3にRICPD法、ICFPD法により深さ5mmの人工欠陥試験片を測定して得られた信号分布を示す。参考のため試験片に直接電流を流す従来の手法であるACPD法による結果(3kHz, 2A)も併せて示した。横軸は探触子の電位差測定端子中心の欠陥からの距離を、縦軸は測定電位差(V)の無欠陥部における電位差(V_0)からの変化量($V-V_0$)を表示している。ICFPD法とRICPD法の電位差変化分布の形状に違いは見られなかった。すなわち、電位差は端子が欠陥に接近すると共に減少し、端子中心が欠陥から約10mm離れた位置で最小値をとりその後徐々に増加し端子中心と欠陥位置とが一致した点で最大値をとる。端子が欠陥に接近すると共に電位差が減少するのは、一定値の電流を検査対象に直接流すACPD法による結果と比較して、本手法が電磁誘導現象を利用して電流を試験片に流しているためであると考えられる。すなわち探触子が欠陥に接近すると欠陥の存在によりその付近の試験片のインピーダンスは見かけ上高くなり、誘導される電流値は減少するため測定される電位差も減少するものと考えられる。この電位差の減少は、誘導電流が裏面欠陥を迂回することにより欠陥の真上に生じる電流密度の高い領域の影響により打ち消され、電位差は探触子と欠陥とが一致する位置まで上昇する。

3・2 ICFPD法とRICPD法の裏面欠陥検出感度の比較 人工欠陥試験片を測定して得られた、各深さの欠陥に対する最大電位差(V_{max})の V_0 からの変化量($V_{max}-V_0$)を裏面欠陥深さに対して図4に示す。RICPD法の欠陥部における電位差変化量はICFPD法より2.5倍ほど大きくなり、ICFPD法では検出が困難であった、深さ1mmの裏面欠陥の検出が可能である。図中の曲線はRICPD法の実験結果に対する3次式による近似曲線、すなわち欠陥深さ d と最大電位差変化($V_{max}-V_0$)との較正曲線であり次式で表される。この式を用いて測定された電位差変化を欠陥深さに換算することができる。

$$(V_{max}-V_0)=9.954 \times 10^{-4} d+4.509 \times 10^{-2} d^2-2.250 \times 10^{-2} d^3+6.690 \times 10^{-3} d^3 \quad (1)$$

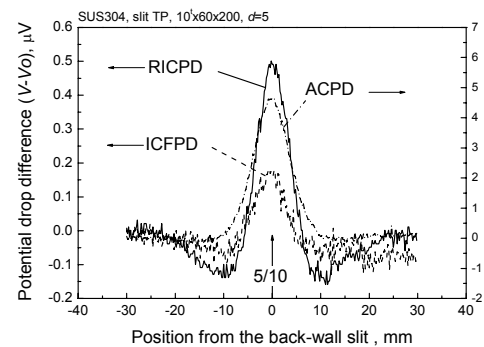


Fig. 3 Potential drop difference distributions measured on the artificial defect specimen (d=5mm)

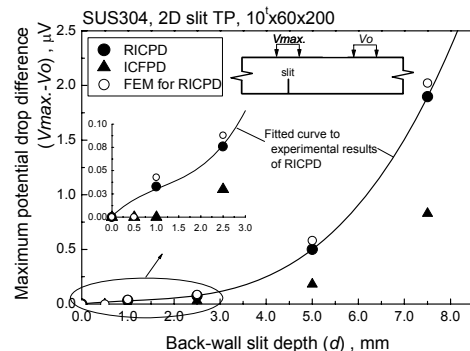


Fig. 4 Maximum potential drop difference plotted as a function of slit depth

4. 電位差の有限要素法解析

4・1 有限要素モデル 電磁誘導現象を利用した電位差法では、電流を検査対象に直接印加しないため、誘導電流の経路は試験片形状、き裂の深さおよび長さ、誘導線の長さ、誘導電流の表皮深さ等のパラメータにより複雑に変化するものと考えられる。測定結果のみを用いる実験的アプローチによって、これらのパラメータと誘導電流経路およびそれに起因する電位差の関

Table 1 List of performed FEM analysis

No.	Induction coil	Back wall slit depth, mm	Frequency, kHz	Objective
①	Long (200mm)	5.0	3.0	Qualitative analysis Obtain a potential drop change distribution
②	Short (40mm)	0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5	3.0	Quantitative analysis Obtain maximum potential drop change

係を明らかにすることは膨大な時間と労力を必要とするため極めて困難であり、数値解析による評価が不可欠である。また本手法の物理的現象をより正確に把握するとともに、データの正当性評価などの観点からも数値解析は有益である。そこで三次元有限要素法 (Finite Element method; FEM)を用いて周波数応答動電磁場解析を実施し実験結果と比較することで数値解析の妥当性を検証した。解析対象はRICPD法による、

- ① 電位差分布の定性的評価
- ② 最大電位差変化の定量的評価

である。RICPD法ではICFPD法と比較して誘導線と試験片との距離が大きいため、誘導線-試験片間で極端に小さい要素分割を必要としない。このためICFPD法と比較してより実際に近いモデルを作成することができるため精度良い解析の可能性が期待される。表1に実施した計算内容をまとめて示す。

公表されているデータを基に、解析に使用した材料定数を表2に示す。試験片と誘導線の材質は、それぞれ実験に使用したものと同一オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 および銅とした。

欠陥深さ・電位差較正曲線を求めるためのFEM解析に用いたモデルの概略図を図5に示す。電位差変化分布の定性的評価に関しては誘導線を試験片と同じ長さにしたモデルを用いた。動電磁場解析では導体周りの空気の磁場も考慮して解析する必要があるためモデルは試験片、誘導線およびそれらを取り囲む空気の領域から構成されている。欠陥は試験片を取り囲む空気と同じ材料定数の要素で表現した。図6に図5に示したモデルから作成された試験片と誘導線の有限要素モデルを示す。8節点のアイソパラメトリック要素を用い、試験片の要素分割は板厚方向に9分割、長手方向に62分割、長手方向と垂直な方向に14分割とした。このとき有限要素モデルは、要素数46322、節点数198777である。対称性から1/2モデルで解析を行った。

4・2 RICPD法による電位差変化分布の定性的評価
RICPD法では、探触子を試験片表面で走査させ測定を行う。このため得られる電位差分布をFEMにより計算する場合、検査領域を探触子が移動した時の電位差をそれぞれ計算し分布を求める必要がある。これは探触子が移動する分の有限要素モデルが必要となり、メッシュ生成に多大な時間と労力を要求する。そ

こでFEMによる電位差分布が実験結果と同様のものが定性的に評価するために、試験片表面に試験片長さと同じ長さの誘導線を配置し、電位差測定端子のみを走査させて測定を行う場合を想定して計算を実施した。この場合計算により得られた電流密度分布を電界に換算し、電位差測定端子の間隔で積分することにより電位差分布を得ることができる。

FEMにより求められた、試験片に誘導された電流密度分布のベクトル表示を図7に示す。図7(a)は対称面($z=0$ 面)側から試験片を表示したもので、試験片長手方向全体を示したものの他に欠陥部を拡大した図も合わせて示した。欠陥部の拡大図を見ると、誘導電流は裏面欠陥を迂回するため、欠陥真上に電流密度のピークが発生している。また誘導電流は試験片板厚方向全体にわたって同じ方向に流れておりループは形成されていない。表面に対する裏面の誘導電流密度はおよそ1/2で、比較的大きい電流が裏面側にも流れている。無限平板中を流れる交流電流の表皮厚さを与える式⁽¹⁴⁾を

Table 2 Material properties

SUS304 (Specimen)	ρ	1.02
	μ_r	$70 \times 10^{-8} \Omega m$
Copper (Induction wire)	μ_r	1.0
Air	μ_r	1.0

μ_r : Relative permeability, ρ : Electrical resistivity

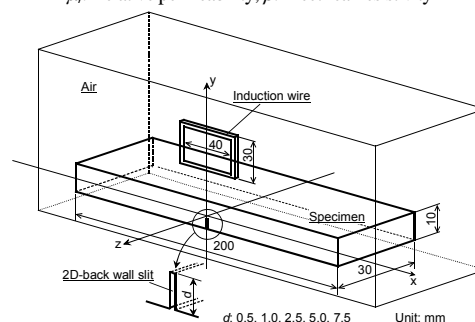


Fig. 5 Illustration of the FEM model for the calibration curve

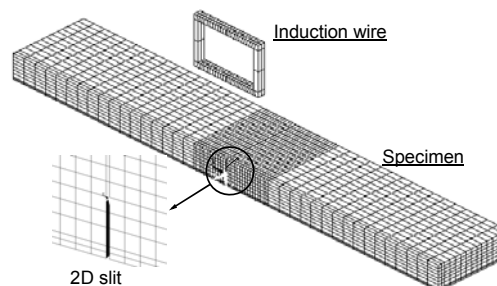


Fig. 6 Mesh for the specimen and the induction wire

用いて、SUS304 の周波数 3kHzでの理論的表皮深さを求めると約 7.6mmである。一方、図 7 に示した板厚方向の電流密度分布より求めた表皮深さは板厚より大きく約 11.5mmで、理論値とはかなり異なった値である。これは試験片が無限平板ではないこと、通常の交流電流ではなく誘導電流であることによるものと考えられる。さらにRICPD法で使用している誘導線は、渦流探傷法のタンジェンシャルコイルを大型にしたものと同様のことで、このコイルは幅を増加させることにより、試験片内部まで電流を流すことができ、かつリフトオフの影響を受けにくいコイルであることが知られている⁽¹⁵⁾。このようにRICPD法は通常のACPD法と比較して裏面欠陥の検出に適した手法であると言える。図 7(b)は試験片上方からみた誘導電流密度のベクトル表示で、誘導電流が試験片表面方向(y-z面)においてループを描いているのが明確に確認できる。

FEM により得られた、RICPD 法による深さ 5mm の裏面欠陥を有する試験片の電位差変化分布を図 8 に示す。図中の V および V_0 は、深さ 5mm の 2 次元人工裏面欠陥を有する試験片に対し試験片と同じ長さを持つ誘導線を配置して電位差(V)を計算し、次に同じ有限要素モデルの欠陥部を試験片と同じ物性値に変更して無欠陥試験片モデルとし、同様の計算を実施して無欠陥部における電位差(V_0)を得た。FEM による電位差変化分布は欠陥部前後で減少し欠陥真上で最大値を示しており、絶対値は異なるものの図 3 に示した実験によるものと全く同じ挙動を示している。このように FEM による数値解析の妥当性が定性的に示された。

4・3 RICPD 法による最大電位差変化の定量的評価
欠陥部の最大電位差変化と欠陥深さとの関係を得るため実験と同様の誘導線および試験片をモデル化して実施した計算結果と実験結果を定量的に比較した。欠陥を有する有限要素モデルから最大電位差(V_{max})を得た後、同じモデルの欠陥部を空気の材料定数から試験片の材料定数へと変更することで無欠陥試験片モデルを作成し無欠陥部の電位差(V_0)を得た。これらの結果から最大電位差変化($V_{max}-V_0$)を算出した。

図 4 に RICPD 法に対する FEM の計算結果をあわせて示した。実験結果と比較して計算結果が若干高い値を示しているものの、両者は比較的良好な一致を示している。また実験では有意の電位差変化が得られなかった深さ 0.5mm の人工欠陥は、数値解析によっても有意の変化が得られず、今回の条件では検出不可能であることが分かる。以上より RICPD 法に対して FEM による最大電位差変化の定量的数値解析を行うことができ、検出限界の予測が可能である。さらに、3・1 節で

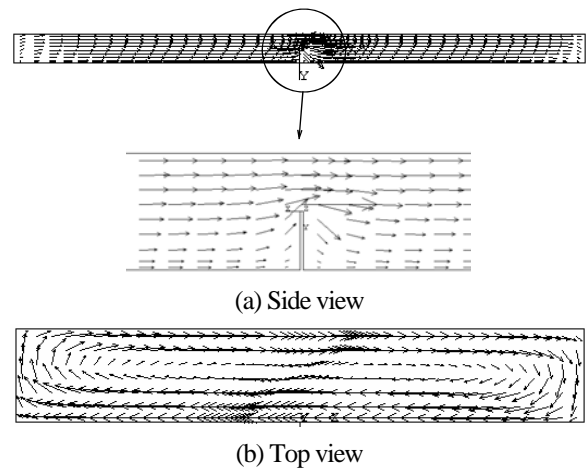


Fig. 7 Induced current distribution

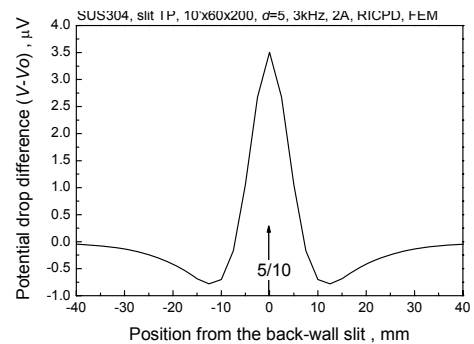


Fig. 8 Potential drop difference distribution for a back surface crack calculated by FEM

示した電位差変化分布に対しても、センサーの移動を表す全ての有限要素モデルを作成すれば、定量的に実験値に近い分布を得ることができるものと考えられる。

5. 裏面疲労き裂の形状評価

疲労き裂試験片を RICPD 法により測定して得られた電位差変化分布を図 9 に示す。中央部に、裏面き裂の存在を示す電位差変化の高い領域が形成されている。図 9 より得られた裏面き裂部における最大電位差変化量と、式(1)に示した欠陥深さと最大電位差変化との較正式を用いてき裂の形状および寸法を評価した。図 10 はその結果であり、予測深さを破面観察より測定された実深さとともに試験片幅方向中央からの距離に対して表したものである。き裂中央付近では裏面疲労き裂の正確な評価が可能である。しかしき裂長さ方向端部付近においては、予測深さは実き裂深さよりも大きく、その誤差はき裂端部に近づくほど大きくなる結果が得られた。これは、き裂幅方向端部ではき裂が浅くなっているため誘導電流はき裂の深さ方向を迂回せず、表面長さ方向を迂回しやすくなるが、き裂長さ 47mm に対して試験片の幅が 60mm と小さいために、表面長さ方向を迂回した電流が試験片端部に集中したためであ

と考えられる。最大き裂深さに関しては表3にまとめて示したように、予測値と実測値との誤差は0.93%であり、極めて高精度の予測が可能である。

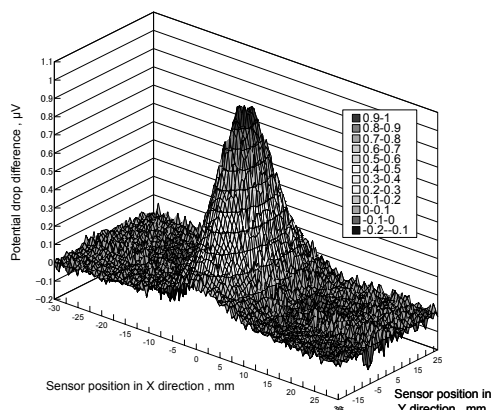


Fig.9 Potential drop difference map measured on the specimen with back wall fatigue crack by RICPD technique

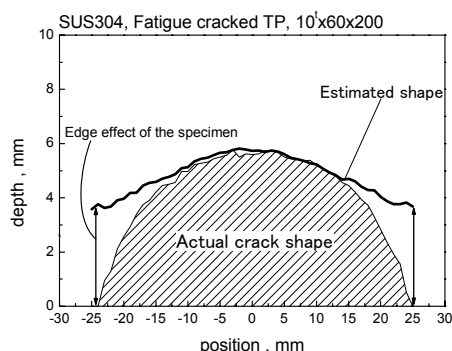


Fig. 10 Estimated crack shape obtained by RICPD technique

Table 3 Comparison between estimated and actual depths

Actual depth, mm	Estimated depth, mm	Error, %
5.76	5.81	0.93

6. 結 論

電磁誘導現象を利用した電位差法の一つである遠隔誘導型電位差(RICPD)法を裏面欠陥の検出と裏面疲労き裂の形状予測に適用した。また RICPD 法による裏面欠陥測定に対して有限要素法による数値解析の可能性について検討した。その結果以下の知見を得た。

- (1) 板厚に対して最大深さが約 57.6%の裏面疲労き裂に対して、き裂幅方向端部では誤差が生じるが中央部においては正確な形状予測が可能であり、最大き裂深さの予測値と破面観察より得られた実測値との誤差は0.93%であった。
- (2) 有限要素法により RICPD 法の定量的数値解析が可能で、検出限界の予測が可能である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ナノテクノロジー基盤機械科学フロンティア」の支援を受けた。ここに記し謝意を表す。

文 献

- (1) Shoji, T., Current Status and Future Direction of Potential Drop Method for QNDE, Journal of the Japanese Society for Non-destructive Inspection, Vol. 49, No. 11 (2000), pp. 759-766.
- (2) Iwamoto, K., Latest Trend of Non-destructive Test for Boiler, THE THERMAL AND NUCLEAR POWER, Vol. 491, No. 48 (1997), pp.910-920.
- (3) Saka, M., Highly Sensitive Nondestructive Evaluation of Cracks, Transactions of IEE Japan, Vol. 119-A, No. 3 (1999), pp. 241-245.
- (4) Ju, Y., Saka, M., Uchimura, Y., Evaluation of the shape and size of 3D cracks using microwaves, NDT & E International, Vol. 38, No. 8 (2005), pp. 726-731.
- (5) Clark, R., Dover, W. D., Bond, L. J., The effect of crack closure on the reliability of NDT predictions of crack size, NDT International, Vol. 20, No. 5 (1987), pp. 269-275.
- (6) Kanoh, Y., Abé, H., Proposal for Nondestructive Evaluation Procedure of 3D Crack shape by Means of Electrical Potential Method, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers A, Vol. 58, No. 547 (1992), pp. 72-79.
- (7) Saka, M., Hirota, H., Abé, H., Komura, I., NDE of a 3-D Surface Crack Using Closely Coupled Probes for DCPD Technique, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 120, No. 4 (1998), pp. 374-378.
- (8) Dover, W. D., Collins, R., Recent advances in the detection and sizing of crack using alternative current field measurements (ACFM), British Journal of NDT, Vol. 33 (1980), pp. 291-295.
- (9) Collins, R. et al., Measurement of crack depth in a transition weld using ACPD, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 11 (1992), pp. 545-552.
- (10) Kim, H., Shoji, T., A Study on Induced Current Focusing Potential Drop (ICFPD) Technique -Examination of the Sizing Accuracy of Defects and its Frequency Dependence-, Journal of The Society of Materials Science Japan, Vol. 43, No. 494 (1994), pp. 1482-1488.
- (11) Yi, Y., Shoji, T., Measurement of Shape of 3-Dimensional Surface Crack Using ICFPD Technique, Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers A, Vol.63, No.605 (1997), pp. 68-72.
- (12) Sato, Y., Shoji, T., High Sensitivity Inspection of Defects in Welds by Remotely Induced Current Potential Drop Technique, Nondestructive Characterization of Materials IX, American Institute of Physics (1999), pp. 107-112.
- (13) Newman, J.C., Raju, I.S., An empirical stress intensity factor equation for the surface crack, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15 (1981), pp. 185-192.
- (14) Schieber, D., Electromagnetic Induction Phenomena, (1986), p. 190, Berlin; Tokyo: Springer-Verlag.
- (15) Koyama, K., Hoshikawa, H., Flaw detection of uniform eddy current probe for lift-off variation, Proceedings of Symposium on NDT Techniques for Maintenance Inspection Using Surface Methods (2000), pp. 1-8.